تخمین پارامترهای طراحی ژئوتکنیکی خاک بهسازی‌شده به‌روش پیش‌بارگذاری بااستفاده از نتایج ابزارگذاری و روش عددی- مطالعهٔ موردی★

خسرو مهرشاهی[۱] حمید علی الهی[۲]

چکیده *در این مقاله بااستفاده از آنالیز برگشتی حاصل از نتایج ابزاردقیق و به‌کمک روش عددی، به برآورد پارامترهای تأثیرگذار در روند طراحی عملیات پیش‌بارگذاری با خاکریز به‌همراه زهکش‌های قائم (PVDs) پرداخته شده است. به‌عنوان مطالعهٔ موردی، پروژهٔ انبار نفت ماهشهر واقع در بندر ماهشهر درنظر گرفته شده است. برای کنترل نتایج محاسبات و عملکرد مناسب خاکریزها از ابزارهایی دقیق نظیر نشست‌سنج‌ها و پیزومترها که در تمامی نقاط خاکریز نصب شده‌اند، بهره گرفته‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای آزمایشگاهی درنظر گرفته شده برای محاسبات اولیهٔ نشست تحکیمی خاک کمتر از مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده درنظر گرفته‌شده است. درنهایت مقادیر نشست تخمینی مخزن نفت مربوط در قبل و پس از بهسازی خاک مورد مقایسه قرار گرفته است که نتیجهٔ حاصل حاکی از عملکرد مناسب عملیات پیش‌بارگذاری خاک در پروژهٔ حاضر می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی پیش‌بارگذاری، زهکش‌های شعاعی، نشست تحکیمی، زمان تحکیم، روش عددی.

Estimating the Geotechnical Design Pararameters of Improved Soil by Preloading Method Using Instrumentation Results and Numerical Approach- a Case Study

Kh. Mehrshahi H. Alielahi

Abstract *In his paper, back-analysis using rsults from instrumentation by finite element software for design of preloading method by embankment with prefibricated vetical drains (PVDs) was used, and the results were compared with each other. Hence, the basic geotechnical parameters obtained by laboratory and field experiments have been modified using this method. In this regard, the Mahshahr oil storage project has been used as a case study. All of the methods that are used for improving soil must ultimately result in increased soil resistance parameters, reduced compressibility, and reduced soil permeability. The soil improvement technique using preloading was used in Mahshahr where there are soft soil layers beneath higher than sub-surface water. control performance of the embankments, some instruments such as Settlement Plates and Piezometers have been used. The results obtained from the analysis shows that settlement parameters obtained from the instruments data by back-analysis were less than primary consolidation settlement parameters based on laboratory tests. Finally, soil settlement estimation of the oil tank was compared before and after preloading, and it was found that using this method for soil improvement can be very efficient in the current project.*

Key Words Preloading Method, Radial Drains, Consolidation Settlement, Numerical Approach.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۹/۲۱ تاریخ پذیرش آن ۹۵/۹/۹ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران. Email: h.alielahi@iauz.ac.ir

مقدمه

در پروژه‌های مهندسی پیش از احداث سازه‌ها برروی خاک‌های نرم و تحکیم‌پذیر به‌منظور جلوگیری از نشست‌های بزرگ و غیریکنواخت سازهٔ موردنظر، اصلاح و بهبود این خاک‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. تمامی روش‌های اصلاح خاک درانتها باید منجر به افزایش پارامترهای مقاومتی، کاهش تراکم‌پذیری و کاهش تراوایی خاک شوند. در این راستا، امروزه پیش‌بارگذاری به‌عنوان یکی از روش‌های سنتی و متداول به‌منظور بهسازی خاک‌های نرم نشست‌پذیر باتوجه به سهولت در اجرا و نیز اقتصادی بودن آن، مورداستفادهٔ فراوانی دارد [۱]. اصول اساسی این روش مبتنی بر کاهش تخلخل خاک‌ها در اثر تحکیم و محو اضافه‌فشار آب در خاک‌های ریزدانه در اثر اعمال بار در سطح زمین در یک بازهٔ زمانی مشخص و سپس باربرداری آن و ساخت سازهٔ دائمی است. ازجمله مزایای این روش سادگی در اجرا، کنترل و اندازه‌گیری میزان نشست زمین و در بعضی موارد میزان فشارهای آب منفذی بااستفاده از ابزارگذاری و بررسی رفتار و عملکرد این روش در حین اجرا می‌باشد. همچنین این روش بااستفاده از زهکش شعاعی به‌منظور افزایش سرعت نشست تحکیمی به دو شکل استفاده از خاکریز و یا مکش و همچنین ترکیب آنها با یکدیگر قابل انجام است [2].

به‌طور کلی خاک های رسی نرم به‌علت تراوایی کم به زمان زیادی برای نشست تحکیمی نیاز دارند. برای افزایش سرعت تحکیم در این خاک‌ها زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (Prefabricated Vertical Drains) در خاک نصب می‌شوند. زهکش‌های شعاعی با کوتاه کردن مسیر زهکشی موجب افزایش سرعت فرآیند تحکیم می‌شوند که این عمل به نوبهٔ خود سبب افزایش مقاومت خاک رس به‌صورت سریع می‌گردد و توانایی پذیرش بار جدید خاک را افزایش می‌دهند [2 و ۱].

امروزه مطالعات متعددی برروی این روش به‌منظور بهسازی خاک نرم انجام پذیرفته است که از نمونه‌های موفق پیش‌بارگذاری بااستفاده از زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته در پروژه‌های بهسازی خاک می‌توان به مطالعات بوشان و همکاران [3] اشاره کرد. پروژهٔ موردنظر انبار ذخیرهٔ مایعات در کشور اندونزی به مساحت ۲۵۳۰۰ مترمربع برروی لایه‌ای به ضخامت ۳ الی ۸ متر رس نرم تراکم‌پذیر واقع شده است که با خاکریزی معادل ۱۰ الی ۱۳ متر ارتفاع و با به‌کارگیری زهکش‌های نواری نشستی معادل ٦۰ الی ۱۷۰ سانتی‌متر به‌وقوع پیوسته است. ایندراراتنا و ردانا [4] بیان نمودند که عملیات پیش‌بارگذاری با نصب زهکش‌های نواری، اثر ناحیهٔ به‌هم‌خوردهٔ (Smear Zone) اطراف زهکش‌های شعاعی در مدت زمان کم (چند ده روز) قابل‌توجه است ولی در مدت زمان زیاد (٤۰۰ روز) اثری نداشته است. همچنین ایندراراتنا و همکاران [5] مطالعات تحلیلی و عددی برروی تحکیم خاک رس نرم انجام دادند و متوجه شدند که کاهش درجهٔ اشباع خاک اطراف مندرل (Mandrel) یا هادی زهکش شعاعی در موقع نصب می‌تواند در مرحلهٔ اولیهٔ تحکیم موجب کاهش سرعت محو اضافه‌فشار آب حفره‌ای شود.

ساتانانتان و ایندراراتنا [6]، ویژگی منطقهٔ دست‌خوردهٔ اطراف زهکش ایجادشده توسط مندرل زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته را موردبررسی قرار دادند و دریافتند که وسعت ناحیهٔ دست‌خوردهٔ اطراف زهکش در خاک‌های رسی مرویا (Moruya) حدوداً ۲/۵ برابر شعاع معادل زهکش می‌باشد. به‌هرحال وسعت ناحیهٔ دست‌خورده به‌علت شکل زهکش، سرعت نصب زهکش و همچنین سختی خاک می‌تواند قابل‌تغییر باشد.

ســـــائوواپاکیپبون و اینـــــدراراتنا [7] تـــــأثیر پیش‌بارگذاری بـه‌روش ایجـاد مکـش در تسـریع عمـل تحکیم رس نرم بانکوک بااستفاده از PVD درمقایسه بـا نتایج متناظر این آزمایش بدون پیش‌بارگذاری مکـش را ارائه نمودند. از پـروژه‌هـای موفـق دیگـر مـی‌تـوان بـه تحقیقات روجیکیاتکامجرن و همکاران [8] اشاره نمـود. ایشان بااسـتفاده از نـرم‌افـزار اجـزای محـدود آبـاکوس (ABAQUS) و بااسـتفاده از مـدل رفتـاری کـم– کلـی اصلاح‌شده (Modified Cam-Clay) به مدل‌سازی انبـار ذخیرۀ مایعـات در بنـدر تیـانجین (Tianjin) در کشـور چین پرداختند. ویژگی ژئوتکنیکی خاک ایـن منطقـه تـا عمق ۱۵متری از خاک بسیار نـرم تحکـیم‌پـذیر تشـکیل یافته و برای بهسازی خاک با روش پـیش‌بارگـذاری بـه سرباری معادل ۱٤۰ کیلو پاسکال نیاز بوده است. ایشـان با ترکیب پیش‌بارگذاری از نوع خاکریز و مکش، مشکل ارتفاع زیاد خاکریز را حل نمودند و بامقایسۀ نتایج ابزار دقیق و پیش‌بینی‌های انجام‌شده به این نتیجه رسیدند که استفاده از ترکیب خـاکریز و مکـش بـه‌طـور هـم‌زمـان مـــی‌توانـــد تـــأثیر بســـزایی در کوتـــاه نمـــودن زمـــان پیش‌بارگذاری و همچنین کاهش ارتفاع خاکریز و جابه-جایی جانبی خاک داشته باشد.

دار و همکـاران [9]، رونـد پـیش‌بارگـذاری بنـدر چیتاگونگ (Chittagong Sea Port) در کشور بنگلادش را موردمطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که نسبت ضریب تحکیم شعاعی به قائم (C_h/C_v) عـددی معـادل ۱/۵۳ و همچنین نسبت ضـریب افقـی بـه قـائم تراوایـی خـاک (K_h/K_v)، ۲/۰۷ خواهـــد بـــود. تدجاکوســـوما [10] بااستفاده از سیستم پیش‌بارگذاری و زهکش‌های شعاعی بـه بررسـی خـاک‌هـای نـرم و رسـی منطقـۀ سـورابایا (Surabaya) در کشور اندونزی پرداختند. ایشان در ایـن تحقیق به این نتیجه رسیدند که استفاده از پیش‌بارگذاری در بهسازی خاک این منطقه بسیار مؤثر بوده اسـت و در مدت زمانی حدود ۲۸۰ روز میزان نشست با اسـتفاده از زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته درمقایسه با حالت بدون زهکش دو برابر افزایش یافتـه اسـت. همچنـین ایشـان متوجه شدند که میزان نشست در اعماق سـطحی خـاک بسیار بیشتر از میزان نشست در اعماق زیاد خـاک مـی-باشد.

برگادو و همکاران [11] زهکش‌های پـیش‌سـاختۀ معمولی را با زهکـش‌هـای پـیش‌سـاختۀ مکـش‌شـونده موردمقایسه قـرار دادنـد و دریافتنـد کـه زهکـش‌هـای پیش‌ساختۀ مکش‌شونده در حـدود ۱/۷ الـی ۱/۸ برابـر زهکش‌های معمولی سرعت نشست را افزایش می‌دهـد. همچنین بااستفاده از این زهکـش‌هـا مـی‌تـوان دسـت-خوردگی کمتری در خاک اطراف زهکش ایجـاد نمـود. از جمله آخرین مطالعات انجام‌شده در سال ۲۰۱۵، جیـا لام [12] به بررسی عملکـرد پـروژۀ بهسـازی خـاک در رس بانکوک (Bangkok) بااستفاده از ترکیـب دو روش پیش‌بارگذاری با خاکریز و مکش به‌همراه زهکـش‌هـای پیش‌ساخته (PVD) پرداختند. در این تحقیق بااستفاده از دو روش تحلیلی و عددی پارامترهای دخیـل در مسـئله درمقایسه‌با نتایج اندازه‌گیری‌شده ابـزار دقیـق را بـرآورد نمودند.

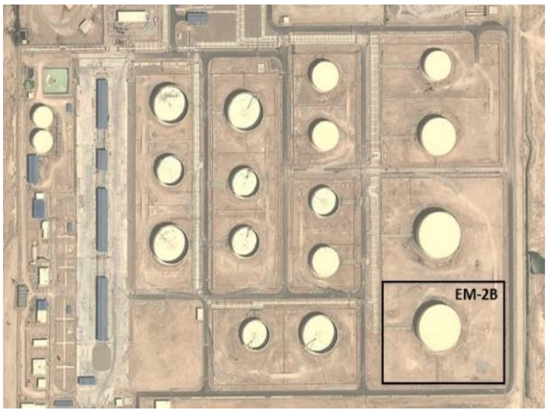
با مرور ادبیات فنی مشاهده مـی‌شـود کـه تمرکـز اکثر مطالعات انجام‌شده بر عملکرد و کارایی زهکش‌هـا در پروژه‌های پیش‌بارگذاری با خاکریز می‌باشد. ازاین‌رو استخراج پارامترهای اصـلاح‌شـده بـا مـدل‌سـازی‌هـای عددی بااستفاده از آنالیز معکوس به‌کمک ابزار دقیق بـه ندرت موردتحقیق قرار گرفته است. همچنـین در زمینـۀ پیش‌بینی مقـادیر نشسـت مخـازن نفـت پـس از اتمـام عملیات پیش‌بارگذاری مبتنی بر پارامترهای اصلاح‌شـده که می‌تواند در ادامـۀ رونـد طراحـی و اجرایـی پـروژه کمک شایانی داشته باشد، مطالعات محدودی انجام شده است؛ لذا در این مقاله به بررسی عملکرد بهسازی خاک بااستفاده از روش پیش‌بارگـذاری بـا خـاکریز بـه‌همـراه زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (PVD) در پروژۀ انبـار نفت ماهشهر به‌عنوان مطالعۀ موردی پرداخته شده است.

ازاین‌رو، بااستفاده از آنالیز برگشتی نتایج حاصل از ابزار دقیق و به‌کمک نرم‌افزار اجزای محدودPlaxis 3D پارامترهای ژئوتکنیکی واقعی برآورد شده است و پارامترهای اولیهٔ پیش‌بینی‌شدهٔ تأثیرگذار حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی بااستفاده از این روش تصحیح گردیده و برای ادامهٔ روند طراحی و عملیات اجرایی پیشنهاد شده است. درانتها نیز کارایی روش پیش‌بارگذاری بامقایسهٔ نشست‌های پیش‌بینی شدهٔ خاک نرم و نشست‌های ناچیز قابل‌اغماض بعد از عملیات پیش‌بارگذاری در اثر احداث مخازن نفت، موردارزیابی قرار گرفته است.

پروژهٔ انبار نفت ماهشهر

معرفی پروژه

پروژهٔ بندر ماهشهر در استان خوزستان و شهرستان ماهشهر با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۳ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۳ دقیقه واقع شده است. ارتفاع ماهشهر از سطح دریا ۲/۶ متر و ارتفاع محل پروژه از سطح دریا ۱/۲ متر الی ۲/۲ متر می‌باشد. این پروژه شامل مخازن ذخیرهٔ سوخت و همچنین تأسیسات و ساختمان‌های مسکونی مجاور آنها می‌باشد که نقشهٔ جانمایی پروژه در شکل (۱) ارائه شده است. مخزن ذخیرهٔ سوخت موردمطالعه در این تحقیق شامل مخازن Tank 403 (خاکریز EM-2B) باتوجه به دردسترس بودن نتایج ابزار دقیق می‌باشد. باتوجه به نوع لایه‌های خاک و شرایط زیرسطحی در محل پروژه و قرارگیری لایه‌های تحکیم‌پذیر در زیر مخازن یادشده، حجم بهسازی موردنیاز برای اصلاح خواص خاک به‌منظور جلوگیری از نشست و گسیختگی خاک در اثر بارهای ناشی از مخازن، بسیار زیاد است. همچنین باتوجه به وسعت بالای منطقهٔ موردنظر، استفاده از شالودهٔ عمیق (شمع) و همچنین استفاده از روش‌های دیگر بهسازی خاک باتوجه به نوع خاک، غیراقتصادی و زمان‌بر بوده است. لذا در این پروژه، گزینهٔ بهسازی خاک به روش پیش‌بارگذاری با خاکریز به‌همراه نصب زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (PVD) در دستور کار قرار گرفته است.



شکل ۱ نقشهٔ جانمایی مخازن پروژهٔ انبار نفت ماهشهر

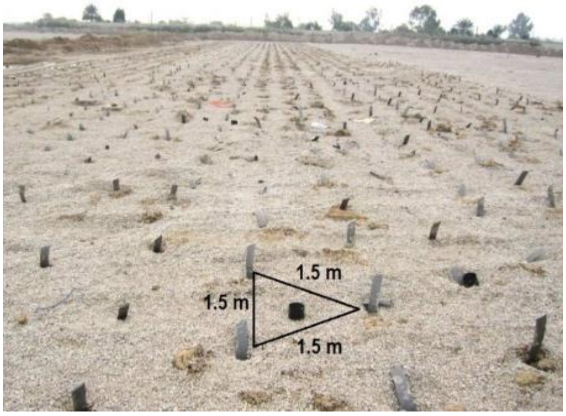


شکل ۲ نمایی از خاکریز EM-2B

به‌منظور بهسازی خاک مخزن مذکور از خاکریز EM-2B به مساحتی معادل ۹۵۵۰ مترمربع مطابق شکل (۲) استفاده شده است. فاصلهٔ زهکش‌های شعاعی ۱/۵ متر و طول هر زهکش ۲۵ متر درنظر گرفته شده است. زهکش‌های شعاعی (PVD) از نوع نواری (Colbonddrain CX1000) [2] به ابعاد ۱۰ در ۰/۳۶ سانتی‌متر بوده است که این زهکش‌ها مطابق شکل (۳) به‌صورت آرایش مثلثی در محل نصب شده‌اند.



(الف)

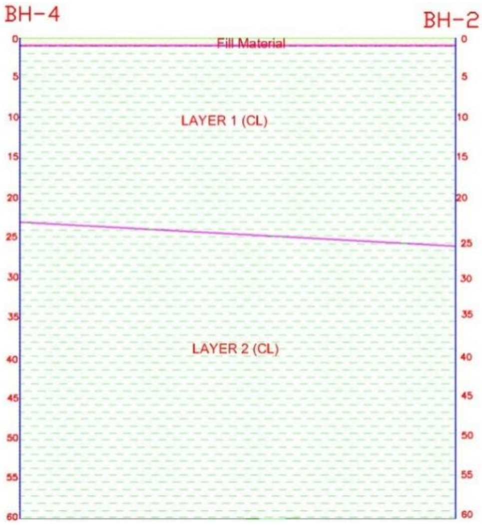


(ب)

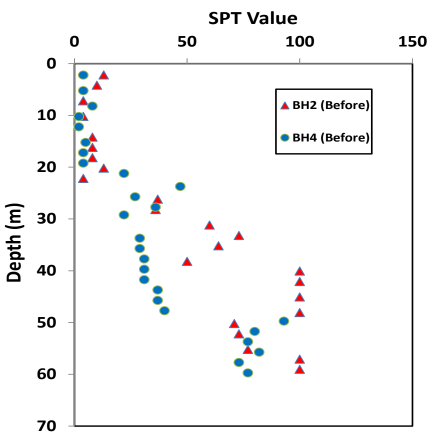
شکل ۳ الف) نمایی از اجرای زهکش‌های نواری در زیر خاکریزها، ب) آرایش زهکش‌ها در پلان

ویژگی‌های ژئوتکنیکی پروژهٔ انبار نفت ماهشهر

باتوجه به مطالعات ژئوتکنیکی انجام‌شده در محل خاکریز (EM-2B)، وضعیت لایه‌های خاک عمدتاً از جنس رس با خاصیت خمیری کم (CL) می‌باشد. برای این منظور از دو گمانهٔ BH-2 و BH-4 به اعماق ۶۰متری به‌همراه آزمایش‌های صحرایی نظیر SPT و CPTu استفاده شده است. پروفیل ژئوتکنیکی آن در شکل (٤) و اعداد SPT در شکل (٥) نشان داده شده است و همچنین مشخصات ژئوتکنیکی و لایه‌بندی خاک محل پروژه در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است که این پارامترها برای طراحی اولیه قبل از اجرای خاکریز و برمبنای نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی در گمانه‌ها پیشنهاد و استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی پروفیل خاک متشکل از دو لایهٔ اصلی به‌همراه زیرلایه‌های مربوط با ویژگی‌های متفاوت است که از عمق ۰ تا ۲۲ متر شامل رس نرم لای‌دار با خاصیت خمیری کم (CL-1) و از عمق ۲۲متری تا عمق ۶۰متری خاک از نوع رس نرم با خاصیت خمیری کم (CL-2) با ویژگی‌های متفاوت تشکیل شده است. باتوجه به بارگذاری ناشی از ساخت مخازن، مشخصات خاک حاکی از نشست‌پذیری پروفیل لایه خاک داشته است.



شکل ٤ پروفیل ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B



شکل ٥ اعداد SPT در محل خاکریز EM-2B

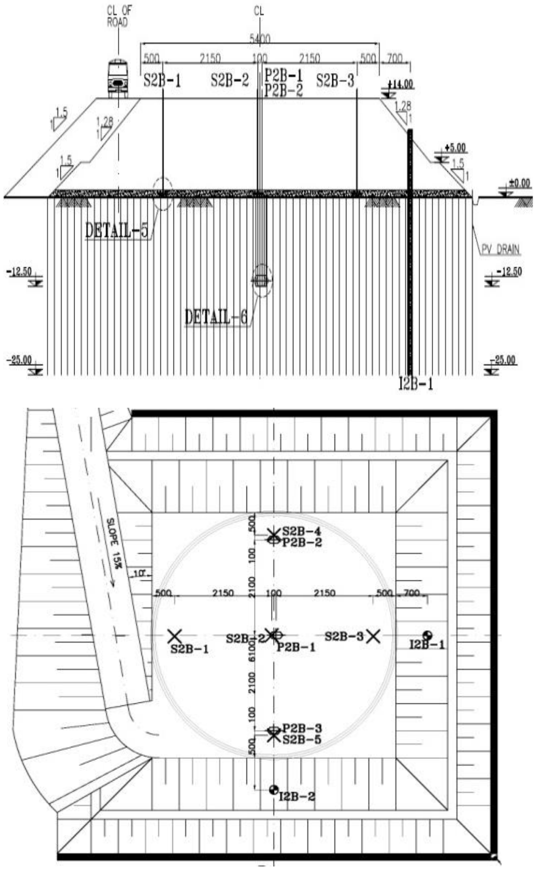
جدول ۱ پارامترهای ژئوتکنیکی مربوط خاکریز EM-2B

عمق لایه خاک (m)	نوع خاک	ν (sat)	C_c	C_s	Pc (kPa)	γ_d (kN/m^3)	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	K_h (m/day)	K_v (m/day)	K_h/K_v	e_0
0 – 10	(CL-1)	0.45	0.17	0.03	70	15.7	20.16	20.59	0.0086	0.0043	2	0.85
10 – 22	(CL-1-1)	0.45	0.17	0.03	180	15.7	20.16	20.59	0.0086	0.0043	2	0.85
22 – 38	(CL-2)	0.45	0.16	0.03	350	16.87	20.64	20.95	0.0026	0.0013	2	0.6
38 – 48	(CL-2-1)	0.45	0.16	0.03	450	16.87	20.64	20.95	0.0026	0.0013	2	0.6
48 – 60	(CL-2-2)	0.45	0.16	0.03	580	16.87	20.64	20.95	0.0026	0.0013	2	0.6

ابزارگذاری و انواع آنها

به‌منظور بررسی و کنترل عملکرد عملیات بهسازی خاک به‌روش پیش‌بارگذاری در خاکریز موردمطالعه از ابزارگذاری‌های مختلفی استفاده شده است. این ابزارها منجر به کسب اطلاعات مفید و درنتیجه تسریع در عملیات ساختمانی با حداقل مخاطره می‌گردند. ابزارهای مورداستفاده در این پروژه شامل صفحات نشست‌سنج (Settlement plates) می‌شوند برای اندازه‌گیری نشست‌های سطح زمین طبیعی به کار می روند و پیزومترها، (Piezometers) برای اندازه‌گیری فشار آب منفذی می‌باشند و همچنین انحراف‌سنج‌ها (Inclinometers) که به‌منظور اندازه‌گیری حرکات جانبی مورداستفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر موارد فوق، از چاه‌های مشاهده‌ای نیز به‌منظور اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی طبیعی و فشار آب هیدرواستاتیک در منطقه استفاده شده است. در خاکریز EM-2B به شکل مربعی به ابعاد ۹۷/۷٤ در۹۷/۷٤ متر و به ارتفاع ١٤/٦٦، برای اندازه‌گیری نشست از پنج نشست‌سنج و برای اندازه‌گیری فشار آب منفذی از سه پیزومتر مطابق شکل (٦) و (۷) استفاده شده است. در این شکل‌ها "S" نشان‌دهندهٔ صفحات نشست‌سنج و"P" پیزومترها می‌باشند.

در شکل (۸) نمودار خاکریزی مرحله‌ای خاکریز EM-2B نشان داده شده است. همچنین شکل (۹) نشان‌دهندهٔ میزان نشست حاصل از تمامی ابزاردقیق‌ها در محل خاکریز EM-2B می‌باشد که پس از گذشت زمان انتظار، میزان نشست خاک واقع در زیر خاکریزها تقریباً به مقدار ثابتی رسیده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) قابل‌مشاهده است فشار آب حفره‌ای حاصل از پیزومترها در مرکز خاکریز EM-2B در پایان زمان خاکریزی به بیشترین مقدار خود رسیده است و با گذشت زمان انتظار، میزان فشار آب حفره‌ای به‌تدریج کاسته شده و فشارآب حفره‌ای به صفر رسیده است که این موضوع نشانگر پایان زمان تحکیم می‌باشد.

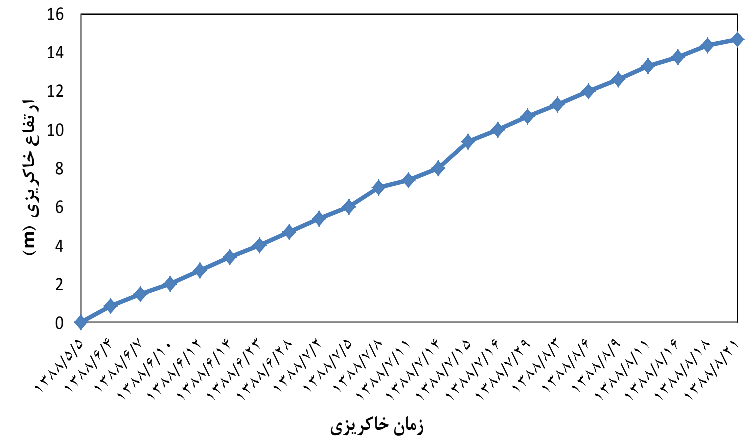


شکل ٦ موقعیت ابزارگذاری خاکریز EM-2B

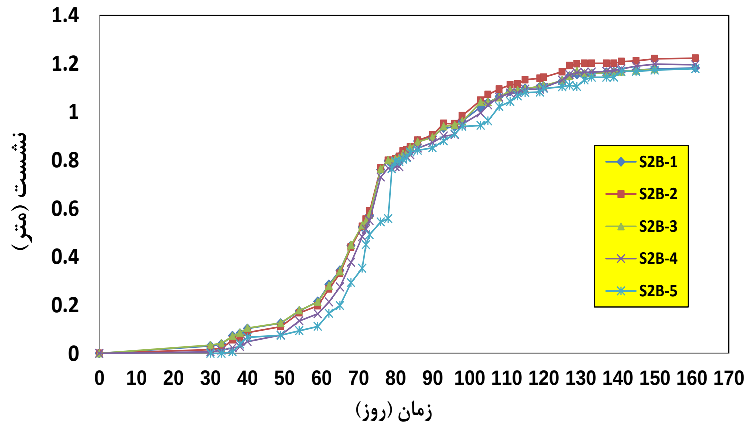


(ب) (الف)

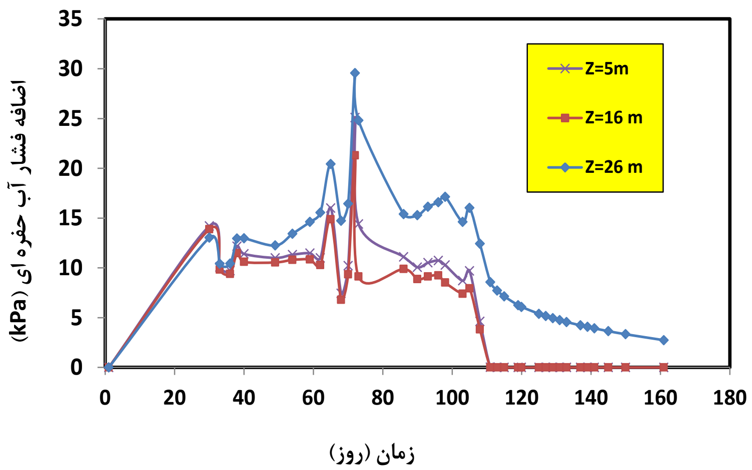
شکل ۷ الف) بالای میلهٔ نشان‌دار متصل به صفحهٔ نشست‌سنج، ب) لولهٔ پیزومتر در بالای خاکریز



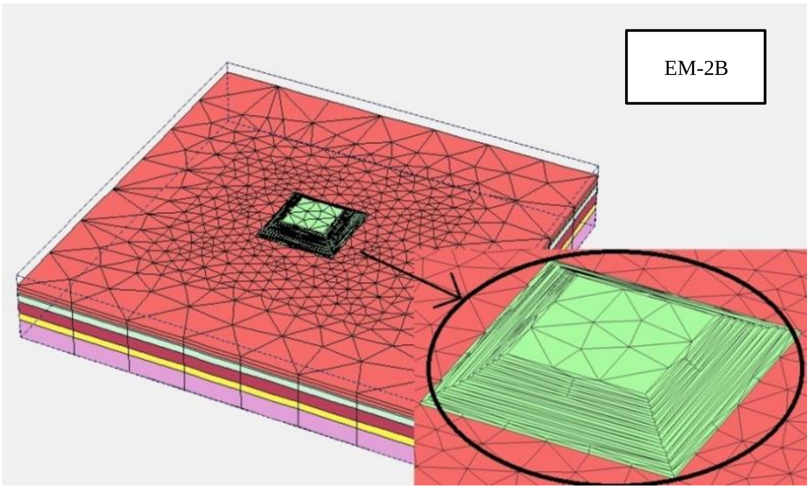
شکل ۸ نمودار تاریخچه خاکریزی خاکریز EM-2B



شکل ۹ مقادیر نشست اندازه‌گیری‌شده توسط صفحات نشست‌سنج در محل خاکریز EM-2B



شکل ۱۰ مقادیر فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری‌شده توسط پیزومترها در محل خاکریز EM-2B



شکل ۱۱ تصویر مدل‌سازی سه‌بعدی خاکریز EM-2B بااستفاده از نرم‌افزار Plaxis 3D

شبیه‌سازی عددی

به‌منظور مدل‌سازی عددی نشست تحکیمی خاک در اثر ساخت خاکریز موردنظر از نرم‌افزار Plaxis 3D مبتنی بر روش اجزای محدود استفاده شده است. این نرم‌افزار برای محاسبات تحکیم از روابط بایوت [14] استفاده می‌نمایند.

فواصل مرزهای جانبی در مدل عددی برای خاکریز EM-2B سه برابر عرض خاکریز در نرم‌افزار درنظر گرفته شده است. همچنین برای ارتفاع ناحیهٔ ژئوتکنیکی قرارگرفته در زیر خاکریز متأثر از ایجاد خاکریز، ارتفاعی معادل ٦٠متر برمبنای عمق گمانه‌ها، لحاظ شده است. همچنین سطح آب زیرزمینی ۱/۵متر پایین‌تر از سطح زمین طبیعی برطبق داده‌های ثبت‌شده در گمانه‌ها درنظر گرفته شده است. در شکل (۱۱) تصویر مدل عددی خاکریز EM-2B در نرم‌افزار Plaxis 3D نشان داده‌شده است.

به‌منظور مش‌بندی مدل عددی از المان‌های ۱۵گره‌ای مثلثی استفاده شده است. همچنین مدل رفتاری خاک از نوع مدل نرم- خزش (Soft Soil Creep) انتخاب شده است [12].

با توجه به عدم درنظرگیری مدل‌سازی مستقیم

زهکش‌ها در این نرم‌افزار، از روش پیشنهاد چای و همکاران [15] استفاده شده است. در این روش پیشنهادی از نفوذپذیری معادل خاک به‌همراه زهکش‌های شعاعی استفاده می‌شود. از این‌رو نفوذپذیری معادل به‌عنوان نفوذپذیری محدوده‌ای از خاک که دارای زهکش می‌باشد به‌عنوان نفوذپذیری معادل به نرم‌افزار معرفی شده است. نفوذپذیری معادل‌شده به این روش و همچنین نسبت نفوذپذیری محل (حاصل از آنالیز برگشتی) به نفوذپذیری آزمایشگاه از روابط زیر قابل‌محاسبه می‌باشد. همچنین پارامترهای این روابط در جدول (۲) آورده شده است.

$$k_{ve} = (1 + \frac{2.5L^2}{\mu D_e^2} \times \frac{k_h}{k_v})k_v \quad (۱)$$

$$\mu = \ln(\frac{n}{S}) + \frac{k_h}{k_s}\ln(S) - \frac{3}{4} + \frac{\pi 2L^2 k_h}{3q_w} \quad (۲)$$

$$(k_h)_f = C_f (k_h)_l \text{ or } (k_v)_f = C_f (k_v)_l \quad (۳)$$

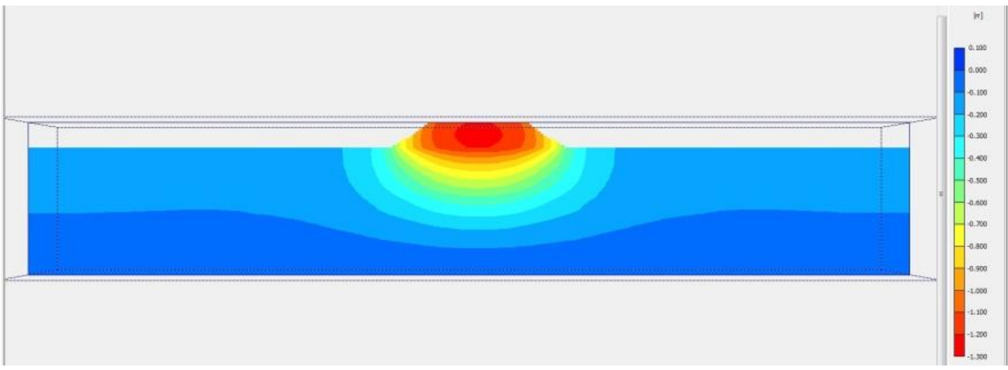
در این روابط k_{ve} نفوذپذیری معادل، k_v نفوذپذیری عمودی خاک، D_e قطر دایرهٔ معادل مربوط به تأثیر زهکش، k_h نفوذپذیری افقی خاک، L طول مؤثر زهکش، n نسبت قطر دایرهٔ معادل به قطر چاه زهکش، d_w قطر چاه زهکش، q_w ظرفیت تخلیهٔ زهکش، k_s نفوذپذیری افقی خاک دست‌خورده، F_s فاکتور دست‌خوردگی خاک است و S فاصلهٔ زهکش‌ها می‌باشد. همچنین $(k_h)_f$ نفوذپذیری افقی خاک محل، $(k_h)_l$ نفوذپذیری افقی خاک آزمایشگاهی و C_f نسبت نفوذپذیری خاک محل به آزمایشگاه می‌باشد. لازم به ذکر است که ابعاد زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (PVD) دارای ۱۰ سانتی‌متر طول و ۰/۳۶ سانتی‌متر عرض با دبی خروجی ۱۴۰ میلی‌لیتر بر ثانیه می‌باشند که مشخصات کامل آنها در جدول (۳) ارائه شده است. در اشکال (۱۲) و (۱۳) به‌ترتیب مقادیر نشست و اضافه‌فشار آب حفره‌ای ناشی از ساخت مرحله‌ای خاکریز به‌صورت دوبعدی نشان داده شده است.

جدول ۲ پارامتر های مورد نیاز برای تبدیل شرایط زهکشی بااستفاده از روش چای و همکاران [13]

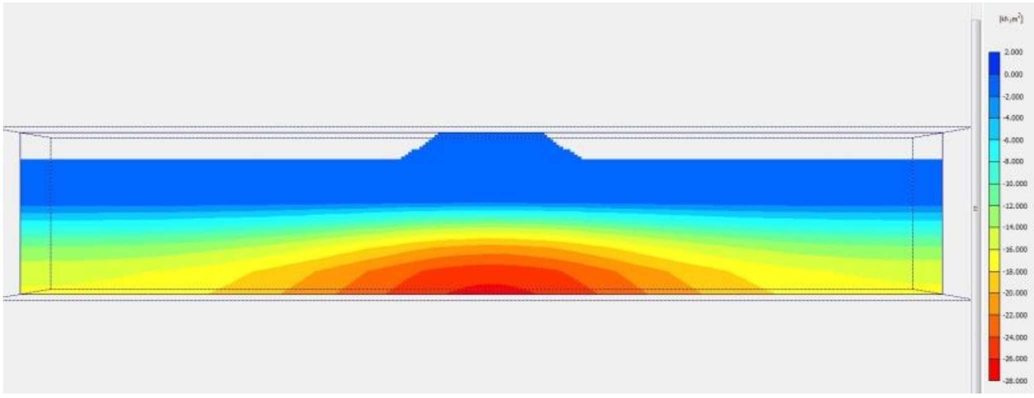
d_w (cm)	d_s (cm)	k_h/k_s	n	S	L (m)	q_w (m3/year)	μ	k_h/k_v	k_h (m/day)	K_v (m/day)	K_{ve} (m/day)
5.18	28.49	3	30.38	5.5	25	12.096	6.14	2	0.0086	0.0043	0.6880

جدول ۳ مشخصات زهکش‌های نواری Colbonddrain Cx1000 [2]

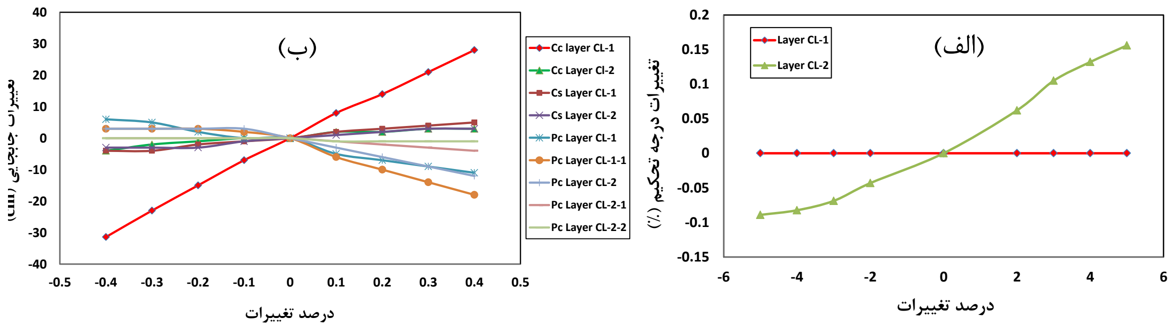
ازدیاد طول در نیروی کششی ۰/۱ کیلونیوتن (٪)	Opening size O_{90} (µm)	نفوذپذیری فیلتر k_f (mm/s)	ظرفیت تخلیه Discharge capacity q_w (ml/s)	عرض مقطع، b، (mm)	طول مقطع، a، (mm)
3%	75	70	140	3.6	100



شکل ۱۲ کانتور نشست در مرکز خاکریز EM-2B در نرم‌افزار Plaxis 3D



شکل ۱۳ کانتور اضافه‌فشار آب در مرکز خاکریز EM-2B در نرم‌افزار Plaxis 3D



شکل ۱۴ الف) نمودار تحلیل حساسیت پارامتر نفوذپذیری درجهت افقی (k_h) در لایه‌های مختلف ژئوتکنیکی، ب) نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای تحکیمی در لایه‌های مختلف ژئوتکنیکی (محل خاکریز EM-2B)

تعیین پارامترهای تأثیرگذار خاک

در این بخش بااستفاده از نتایج ابزاردقیق، به انجام آنالیز حساسیت برروی پارامترهای تحکیمی تأثیرگذار پروفیل خاک در عملیات پیش‌بارگذاری به‌کمک نرم‌افزار Plaxis 3D پرداخته شده است. روش تحلیل حساسیت انتخابی برای این منظور، استفاده از روش مستقیم مبتنی بر سعی و خطا می‌باشد. باتوجه به تعدد پارامترهای دخیل در مسئله، ابتدا تحلیل حساسیت برروی پارامترهای لایه‌های مختلف ژئوتکنیکی مربوط به هر خاکریز انجام می‌شود تا مؤثرترین پارامترها در مقدار نشست و زمان تحکیم تعیین شوند و سپس باتوجه به آنالیزهای برگشتی پارامترهای حاصل از آن محاسبه خواهند شد.

فرایند انجام مطالعات حساسیت پارامترهای ژئوتکنیکی بدین صورت بوده است که در گام اول برای محاسبهٔ مؤثرترین پارامتر در زمان نشست تحکیم (K_h–ضریب افقی تراوایی) مدلی با اطلاعات اولیه ایجاد شده و میزان درجهٔ تحکیم به‌دست‌آمده ثبت شده است. سپس هر پارامتر به‌طور جداگانه آن‌قدر تغییر داده می‌شود تا باتوجه به نتایج ابزاردقیق کمترین مقدار خطا حاصل شود. پس از آن، با جای‌گذاری هر پارامتر به‌دست‌آمده در مدل عددی، مجدداً شبیه‌سازی عددی با پارامتر موردنظر آمادهٔ تحلیل‌های بعدی شده است. به‌همین‌ترتیب تحلیل حساسیت برروی پارامترهای مؤثر در مقدار نشست تحکیمی (C_s ,C_c , Pc) – به‌ترتیب فشار پیش‌تحکیمی، شیب منحنی تحکیم در بارگذاری (نشانهٔ فشردگی) و بار برداری) انجام شده است.

نتایج تحلیل حساسیت انجام‌شده باکمک مدل‌سازی عددی و نتایج ابزاردقیق در محل خاکریز EM-2B در شکل (۱٤) ارائه شده است. نتیجهٔ به‌دست

آمده نشان می‌دهد که پارامتر نفوذپذیری درجهت افقی (K_h) در لایهٔ دوم (CL-2) که دارای بیشترین شیب تغییرات درجهٔ تحکیم می‌باشد به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر در زمان پدیدهٔ تحکیم (شکل ١٤–الف) می‌باشد و مطابق شکل (١٤– ب) پارامتر C_c (نشانهٔ فشردگی) در لایهٔ رسی اول (CL-1) باتوجه به افزایش شیب تغییرات درجهٔ تحکیم، حساس‌ترین پارامتر در مقدار نشست تحکیمی می‌باشند.

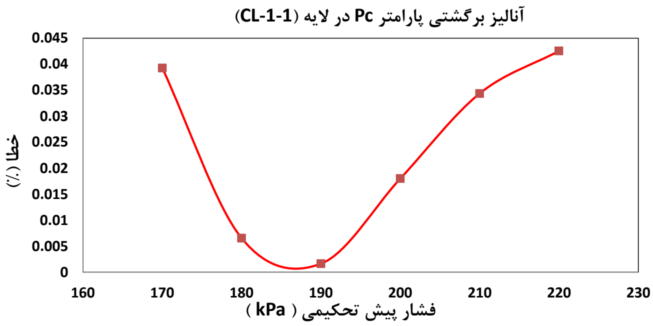
آنالیز برگشتی

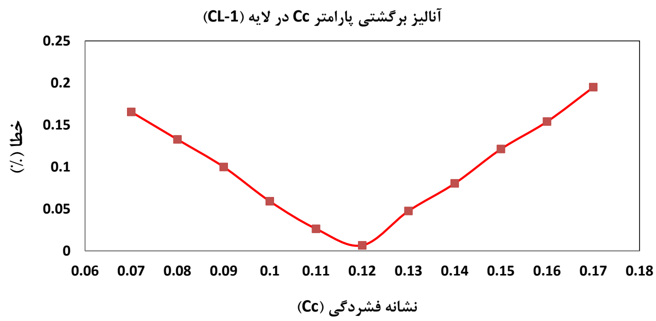
پس از انجام تحلیل حساسیت در بخش قبل و مشخص نمودن مؤثرترین پارامترها در مقدار و زمان نشست تحکیمی خاکریزهای یادشده، در این بخش به آنالیز برگشتی (معکوس) از طریق کمینه‌سازی تابع خطا به‌منظور دست‌یابی به پارامتر بهینه و صحیح پرداخته شده است. در این راستا تابع خطای زیر به‌منظور کمینه‌سازی اختلاف اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط ابزاردقیق و مقادیر محاسبه‌شده از طریق مدل‌سازی عددی معرفی شده است.

$$\text{Error} = \frac{\sum_{K=1}^{N} (U_k - U'_k)^2}{\sum_{K=1}^{N} U'_k} \qquad (٤)$$

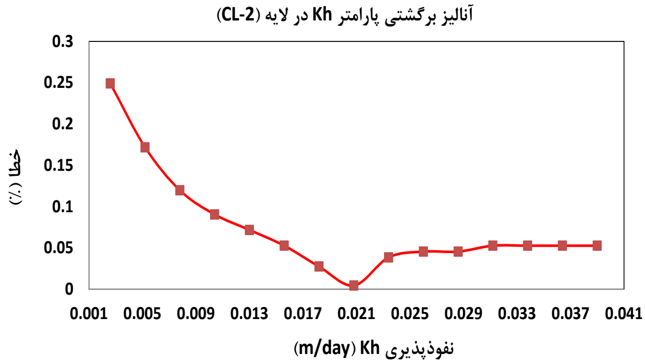
در این رابطه U_K مقدار جابه‌جایی محاسبه‌شده از طریق تحلیل عددی در نقاط متناظر و U'_k جابه‌جایی اندازه‌گیری‌شده در نقطهٔ ابزاردقیق و N تعداد نقاط اندازه‌گیری می‌باشد.

در این تحقیق از متوسط داده‌های ابزارهای نصب‌شده در خاکریز EM-2B که به‌صورت روزانه و هفتگی برداشت شده‌اند، استفاده شده است. مطابق شکل‌های (١٥) و (١٦) آنالیز برگشتی با روش کمینه‌سازی تابع خطا برای پارامترهای مؤثر تحکیمی انجام گردیده است. همان‌طور که مشخص است برای خاکریز EM-2B، تابع خطا برای پارامترهای نشانه فشردگی (Cc) و فشار پیش‌تحکیمی (Pc) به‌ترتیب در لایه‌های CL-1 و CL-1-1 به‌ترتیب در مقادیر ۰/۱۲و ۱۹۰ کیلوپاسکال کمینه شده است. همچنین مقدار ضریب افقی نفوذپذیری در لایهٔ (CL-2) برابر ۰/۰۲۱متر در روز به‌دست امده است.





شکل ١٥ نمودار کمینه‌سازی تابع خطا برای پارامترهای فشار پیش‌تحکیمی Pc و نشانه فشردگی (C_c) در لایهٔ CL-1-1 ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B



شکل ١٦ نمودار کمینه‌سازی تابع خطا برای پارامتر نفوذپذیری افقی(k_h) در لایۀ CL-2 در محل خاکریز EM-2B

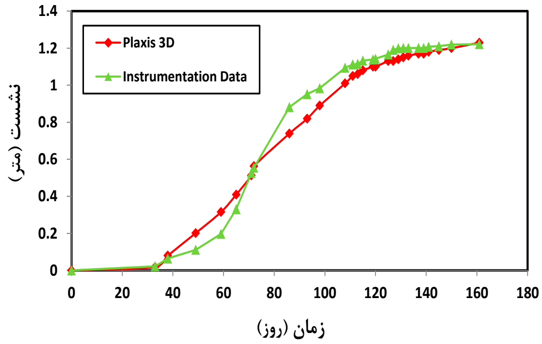
جدول ٤ نتایج حاصل از آنالیز برگشتی پارامترهای تحکیمی در ناحیۀ سه ژئوتکنیکی در محل خاکریز EM-2B

پارامترهای نشست تحکیمی	Pc (CL-1-1) (kPa)	C_c (CL-1)	C_f (CL-2)	K_v (CL-2) (m/day)	K_h (CL-2) (m/day)
مقادیر پارامترهای اولیۀ پیشنهادی	180	0.17	…..	0.0013	0.0026
نتایج آنالیز برگشتی بااستفاده از Plaxis 3D	190	0.12	8	0.0104	0.021

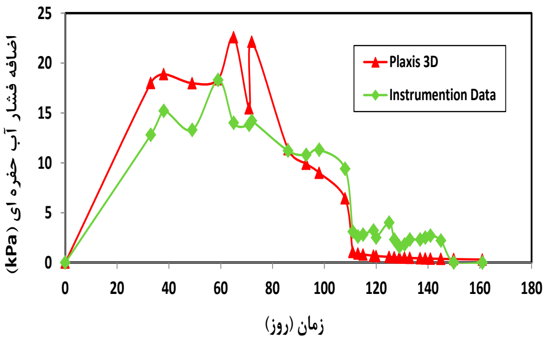
پس از انجام مطالعات عددی و آنالیزهای حساسیت پارامترهای خاک در لایه‌های مختلف ژئوتکنیکی، مطابق نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز معکوس در جدول (٤)، مقدار C_f (نسبت نفوذپذیری افقی محل به آزمایشگاه) در لایۀ CL-2 هشت‌برابر حاصل شده است. به‌عبارت دیگر ضریب نفوذپذیری صحیح حاصل از آنالیز برگشتی ابزاردقیق در حدود هشت‌برابر بیشتر از ضریب نفوذپذیری به‌دست‌آمده از مقادیر پارامترهای طراحی اولیه و برمبنای نتایج آزمایشگاهی قبل از عملیات پیش‌بارگذاری می‌باشد. درواقع این موضوع نشان می‌دهد که مقدار نفوذپذیری افقی واقعی خاک بسیار بیشتر از مقدار تخمین اولیه در محاسبات بوده است.

همچنین نتایج مطالعات عددی برمبنای پارامترهای اصلاح‌شدۀ حاصل از آنالیز برگشتی نشان می‌دهد که مقادیر نشست در مرکز خاکریز EM-2B در حدود ١٢٢/٢ سانتی‌متر به‌دست آمده است درصورتی‌که مطابق طراحی‌ها و پیش‌بینی‌های اولیۀ انجام‌شده، این مقدار برابر ١٣٢سانتی‌متر تخمین زده شده بود. لذا می‌توان دریافت که مقادیر نشست محاسباتی اولیه برمبنای پارامترهای فرض‌شده بیشتر از نشست‌های اندازه‌گیری‌شده بوده است. می‌توان از دلایل کمتر شدن نشست‌های اندازه‌گیری‌شده نسبت به نشست‌های محاسباتی، به تعیین محافظه‌کارانۀ پارامترهای اولیۀ ژئوتکنیکی محاسبات نشست تحکیمی اشاره نمود.

همچنین به‌منظور صحه‌گذاری بر نتایج مدل عددی، مدل‌سازی خاکریز موردنظر در نرم‌افزار Plaxis 3D (برمبنای پارامترهای اصلاح‌شدۀ خاک) با متوسط نتایج ابزاردقیق نشست‌سنج‌ها و پیزومترها موردمقایسه قرار گرفته است. شکل‌های (١٧) و (١٨) مقایسه مقادیر نشست و فشار آب حفره‌ای در طول مدت‌زمانی ١٦١روز برای خاکریز EM-2B از شروع بارگذاری را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج مدل‌سازی عددی هم‌خوانی قابل‌قبولی با نتایج ابزاردقیق دارد.



شکل ۱۷ مقایسهٔ نمودار نشست خاکریز EM-2B در مدل‌سازی عددی و ابزاردقیق (نشست‌سنج)

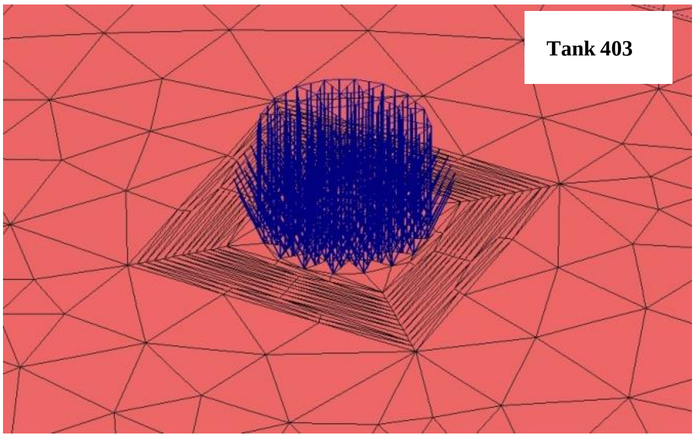


شکل ۱۸ مقایسهٔ نمودار اضافه‌فشار آب حفره‌ای خاکریز EM-2B در مدل‌سازی عددی و ابزاردقیق (پیزومتر)

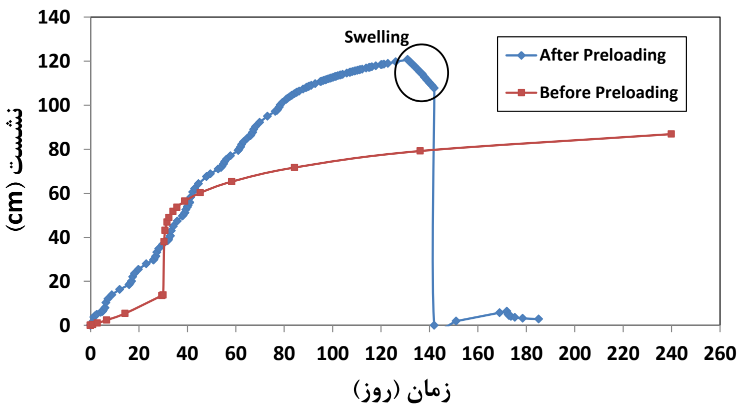
پیش‌بینی نشست مخزن نفت پس از اتمام عملیات بهسازی خاک

پس از دست‌یابی به پارامترهای اصلاح‌شدهٔ حاصل از آنالیزهای برگشتی، به مدل‌سازی مخزن نفت و قرارگیری آن برروی خاک منطقهٔ موردنظر به‌منظور پیش‌بینی نشست‌های احتمالی ناشی از ساخت آن پس از اتمام عملیات پیش‌بارگذاری، پرداخته شده است. مخزن موردنظر Tank 403 در محل خاکریز EM-2B دارای قطری معادل ۵۳/٦٤ متر است که وزنی در حدود ۳۲۹٦۹ تن را به خاک وارد می‌نماید. در شکل (۱۹) تصویر مدل‌سازی مخزن در نرم‌افزار Plaxis 3D نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مخزن موردنظر بااستفاده از تعریف یک بار فشاری معادل در نرم‌افزار مدل شده است. در شکل (۲۰) نتایج میزان نشست خاک پس از اعمال بار مخازن قبل و بعد از پیش‌بارگذاری ارائه شده است. باتوجه به این نمودار خاکریزی طی مدت ۱۰۸ روز ادامه پیدا کرده و سپس در مدت زمان ۵۳ روز (زمان انتظار)، خاک واقع در زیر خاکریز EM-2B به ۹۵ درصد تحکیم خود رسیده است. در این مرحله نشست نهایی خاک ۱۲۲/۲ سانتی‌متر است و اضافه‌فشار آب منفذی به حداقل مقدار خود رسیده است که این موضوع نشانگر پایان زمان تحکیم خاک می‌باشد.

لازم به ذکر است که در مراحل مدل‌سازی علاوه بر خاکریزی، خاکبرداری خاکریزها به‌صورت باربرداری در مدل‌سازی عددی لحاظ شده است تا شرایط واقعی پروژه به‌خوبی شبیه‌سازی شود. مطابق شکل (۲۰)، در این مرحله خاک به مقدار کمی دچار تورم است و با برداشتن خاکریزها از مقدار نشست نهایی کاسته شده و پس از برداشتن کل خاکریز (EM-2B) میزان نشست خاک به مقدار ۱۰۲ سانتی‌متر رسیده است که این موضوع بیانگر تورم خاک پس از برداشتن خاکریز می‌باشد. پس جمع‌آوری خاکریز و پایان تورم نهایی خاک، مقدار تغییرمکان مدل صفر شده و درادامه به بررسی نشست خاک در اثر قرارگیری مخزن Tank 403 پرداخته شده است. پس از ساخت مخزن یادشده در مدت زمان ۳۰ روز و قرارگیری آن برروی خاک بهسازی‌شده، میزان نشست خاک پس از رسیدن به زمان تحکیم نهایی در نرم‌افزار Plaxis 3D به حدود ۹ سانتی-متر رسیده است. همچنین باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده از شکل (۲۰) مشاهده می‌شود که نشست خاک قبل از عملیات بهسازی درصورت ساخت مخزن Tank 403، پس از گذشت زمان تحکیمی، در حدود ٦۸ سانتی‌متر ایجاد شده است که این مقدار نشست موجب بروز مشکلات فراوان در بهره‌برداری و نیز ایجاد خسارت-های جبران‌ناپذیری در این‌گونه مخازن می‌گردد. در شکل (۲۱) تصویر مراحل ساخت مخازن نفت در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. ازاین‌رو، مطابق با نتایج حاصل، نیاز به بهسازی خاک و استفاده از سیستم پیش‌بارگذاری می‌تواند تأثیر بسزایی را در کاهش میزان نشست‌ها و بهبود عملکرد مخازن در حین بهره‌برداری از آنها داشته باشد.



شکل ۱۹ مدل‌سازی مخزن Tank 403 در برنامهٔ Plaxis 3D



شکل ۲۰ نمودار نشست خاک قبل و بعد از پیش‌بارگذاری خاکریز EM-2B در نرم‌افزار Plaxis 3D



شکل ۲۱ مراحل ساخت مخازن نفت در زمان‌های مختلف پروژه

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

استفاده از بهسازی خاک به‌روش پیش‌بارگذاری در خاک‌های رسی نرم یکی از اقتصادی‌ترین و کاراترین روش‌های موجود می‌باشد. لذا در این مقاله به مدل‌سازی عددی عملیات بهسازی خاک به‌روش پیش‌بارگذاری با خاکریز به‌همراه زهکش‌های شعاعی پیش‌ساخته (PVD) در پروژهٔ انبار نفت ماهشهر (مطالعهٔ موردی) پرداخته شده است. به‌منظور مدل‌سازی روند عملیات پیش‌بارگذاری و مقایسهٔ آنها با نتایج ابزارگذاری از نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis 3D استفاده شده است. نتایج نشست‌های مدل عددی با مقادیر نتایج ابزاردقیق کالیبره شده و با استفاده از آنالیز برگشتی داده‌های ابزاردقیق، مهم‌ترین پارامترهای صحیح نشست تحکیمی تأثیرگذار خاک به‌دست آمده است. همچنین میزان نشست تخمینی خاک قبل و بعد از پیش‌بارگذاری در اثر احداث مخازن نفت با یکدیگر موردمقایسه قرار گرفته‌اند. از جمله نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. مقادیر نشست ثبت‌شده بااستفاده از نتایج متوسط ابزارگذاری در خاکریز EM-2B برابر ۱۲۲/۲ سانتی‌متر به‌دست آمده است درصورتی‌که مقدار نشست محاسباتی اولیه براساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی اولیه در مرکز خاکریز EM-2B، برابر ۱۳۲سانتی‌متر به‌دست آمده است که نشان از محافظه‌کارانه بودن مقادیر پارامترهای خاک و به‌دنبال آن میزان نشست محاسباتی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ اولیه می‌باشد.

۲. باتوجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت و آنالیز برگشتی، پارامتر C_f (نسبت نفوذپذیری خاک در محل به نفوذپذیری آزمایشگاه) برای خاکریزهای EM-2B در حدود هشت‌برابر بیشتر از ضریب نفوذپذیری به‌دست‌آمده از مقادیر پارامترهای اولیه برمبنای نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی بوده است. همچنین پارامترهای دیگر نشست تحکیمی نظیر شاخص تراکم (C_c) و فشار پیش‌تحکیمی خاک (Pc) برمبنای نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز معکوس مقادیر متفاوتی نسبت به پارامترهای اولیهٔ طراحی داشته‌اند.

۳. شبیه‌سازی عددی مخزن نفت (Tank 403) در محل خاکریز (EM-2B) نشان می‌دهد که نشست خاک قبل از عملیات بهسازی درصورت ساخت مخزن و پس از گذشت زمان تحکیمی در حدود ٦٨ سانتی‌متر ایجاد می‌شود که بعد از عملیات پیش‌بارگذاری و قرارگیری مخزن این نشست به حدود ۹ سانتی‌متر کاهش یافته است. ازاین‌رو، مطابق با نتایج حاصل نیاز به بهسازی خاک و استفاده از سیستم پیش‌بارگذاری می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش میزان نشست‌ها و بهبود عملکرد آنها به‌خصوص در پروژه‌ها با مقیاس بزرگ و در خاک‌های ریزدانه در حین بهره‌برداری از مخازن نفت شود.

مطالعات تحقیق حاضر نشان می‌دهد که اطمینان به پارامترهای اولیهٔ خاک حاصل از نتایج آزمایشگاهی (به‌خصوص آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی) و صحرایی می‌تواند منجر به خطا در پیش‌بینی طراحی و اجرای مابقی خاکریزها شود. لذا استفاده از ابزارگذاری و تجزیه و تحلیل نتایج آنها، تجربه‌ای مؤثر در کاهش هزینه‌ها و زمان‌بندی پروژه‌های مشابه خواهد بود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود واجب می‌دانند که بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی را از مؤسسهٔ مهندسان مشاور ساحل برای در اختیار گذاشتن اطلاعات مربوط به این پژوهش داشته باشند.

مراجع

۱. استاماتوپولوس، آریس و پاناگیوتیس، کوتزیباس، «اصلاح خاک از طریق پیش‌بارگذاری»، سعید منتظرالقائم، مؤسسهٔ بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، (۱۳۷۸).

2. Federal Highway Administration (FHWA), "Prefabricated Vertical Drains, Vol. I, *Engineering Guidelines*" Report No. RD-86/168, pp. 1-128 (1986).

3. Bhushan, K., Carlos V., Saaty, R., "Soil Improvement by Precompression at a Tank Farm Site in Central Java, Indonesia", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 3, pp. 101-108, (2000).

4. Indraratna, B. and Redana, I W., "Laboratory determination of smear zone due to vertical drain installation", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 96-99, (1998).

5. Indraratna B, Rujikiatkamjorn C, Sathananthan I, Shahin M and Khabbaz H., "Analytical and Numerical Solutions for Soft Clay Consolidation using Geosynthetic Vertical Drains with Special Reference to Embankments", *Proceedings of the 5th International Geotechnical Engineering Conference*, Cairo, Egypt, pp. 55–86, (2005).

6. Sathananthan, I. and Indraratna, B., "Laboratory Evaluation of Smear Zone and Correlation between Permeability and Moisture Content", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, Vol.132, No. 7, pp. 942–945, (2006).

7. Saowapakpiboon, J., D.T. Bergado , Youwai, S., Chai, J.C., Wanthong, P., Voottipruex, P., "Measured and Predicted Performance of Prefabricated Vertical Drains (PVDs) with and without Vacuum Preloading", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 28, No. 1, pp. 1-11, (2010).

8. Rujikiatkamjorn, Ch., Indraratna, B., and Chu, J., "Numerical Modelling of Soft Soil Stabilized by Vertical Drains, Combining Surcharge and Vacuum Preloading for A Storage Yard", Can. Geotech. J, Vol. 44, No. 3, pp. 326–342, (2007).

9. Dhar, AS., Siddique, A., and Amen, SF., "Ground Improvement using Preloading with Prefabricated Vertical Drains", *International Journal of Geoengineering Case Histories*, Vol. 2, No. 2, pp. 86, (2011).

10. Tedjakusuma, B., "Application of Prefabricated Vertical Drain in Soil Improvement", Civil Engineering Dimension, Vol. 14, No.1, pp. 51-56, (2012).

11. Bergado, D.T., Voottipruex, P., Lam, L.G., Hino, T., "Back-analyses of Flow Parameters of PVD Improved soft Bangkok Clay with and Without Vacuum Preloading from Settlement Data and Numerical Simulations", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 42, No. 5, pp. 457-467, (2014).

12. Gia Lam, L., Bergado, D.T., Hino, T., "PVD Improvement of Soft Bangkok Clay with and Without Vacuum Preloading using Analytical and Numerical Analyses", Geotextiles and Geomembranes,

Vol.43, No. 6, pp. 547-557, (2015).

13. Plaxis 3D Foundation (version 1.6) user's Manual. Edited by Brinkgreve, R.B.J. Delf University of Technology and PLAXIS b.v., The Netherlands, (2005).

14. Biot, M., "Gener**a**l Theory of Three-dimensional Consolidation", *Journal of Applied Physics,*Vol. 12, pp.155-164, (1941).

15. Chai J.C, Shen S.L, Miura N.and Bergado D.T., "Simple Method of Modeling PVD Improved Subsoil", *Journal Journal of Geotechnical Engoneering*, ASCE, Vol.127, No.11, PP. 956-972, (2001).